УДК 621.3 Научная статья
https://doi.org/10.32603/2071-8985-2024-17-6-78-83

Редукция модели обменных процессов при идентификации электромеханических объектов

А. Ю. Омельченко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

alex1957.12@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы обоснования и вывода функции Грина как модели электромеханического объекта из обыкновенных дифференциальных уравнений. Для этого обсуждаются вопросы редукции основной модели: идеализация измерительно-управляющего прибора и требования к модели объекта на основе уравнений. В процессе расчета выявляется сложность аналитического вывода функции Грина объекта, что демонстрируется на примере. В разделе «обсуждение результатов» проведен анализ особенностей функции Грина, полученной расчетным путем из обыкновенных дифференциальных уравнений, по сравнению с функцией Грина, полученной посредством идентификации.

Ключевые слова: измерительно-управляющий прибор, обменная механика, квант действия, функция Грина, система «прибор–объект», импульсно-энергетическое представление, координатно-временное представление, обыкновенное дифференциальное уравнение

Для цитирования: Омельченко А. Ю. Редукция модели обменных процессов при идентификации электромеханических объектов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 6. С. 78–83. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-78-83.

Original article

Reduction of the Exchange Processes Model in the Identification of Electromechanical Objects

A. Yu. Omelchenko

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

alex1957.12@mail.ru

Abstract. The issues of justification and calculation of the Green's function, as a model of an electromechanical object, from ordinary differential equations are considered. For this purpose, issues of reduction of the main model are discussed: idealization of the measuring and control device and requirements for the object model based on equations. During the calculation process, the complexity of the analytical derivation of the Green's function of an object is revealed, which is demonstrated by an example. In the «discussion of results» section, an analysis of the features of the Green's function obtained by calculation from ordinary differential equations is carried out in comparison with the Green's function obtained by identification.

Keywords: measuring and control device, exchange mechanics, quantum of action, Green's function, «device–object» system, pulse-energy representation, coordinate-time representation, ordinary differential equation

For citation: Omelchenko A. Yu. Reduction of the Exchange Processes Model in the Identification of Electromechanical Objects // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 78–83. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-78-83.

Введение. Модели обменных процессов, построенные эвристическим путем в [1], требуют дальнейшего обоснования. Такое обоснование может быть достигнуто как обращением к уже известным в других областях модельным фрагментам, так и редуцированием (сведением к уже известным, простым формам в рассматриваемой области).

В основу редуцирования следует положить идеализацию измерительно-управляющего прибора (ИУП) в системе «прибор–объект» (СПО).

Идеальный ИУП прост в том смысле, что он не имеет ограничений ни в измерении объекта, ни в управлении им. Выражается это в нулевой пространственно-временной погрешности, бесконечном измерительно-управляющем диапазоне и «полосе» пропускаемых частот, отсутствии шумов. Модель ИУП, близкая идеальной, с большой, но ограниченной «полосой пропускания» измерительных и управляющих сигналов, также может быть задана в виде линейного обыкновенного дифференциального уравнения (ЛОДУ) сравнительно низкого порядка (до второго включительно).

Таким образом, при редукции полной модели обменных процессов в (СПО) [1] квант действия стремится к нулю, и тем самым может быть осуществлен переход на другую модель описания обменных процессов.

Для сравнения, такой редукции не происходит при реализации предельного перехода к классической механике в [2], где осуществляется лишь частичная редукция основной модели: уравнение Шредингера преобразуется в уравнение Гамильтона–Якоби и уравнение непрерывности. Оба эти уравнения описывают движение вдоль траектории «волнового пакета», а не точки. Неявное сохранение в полученной модели кванта действия говорит и о сохранении основных принципов исходной модели.

Рассматриваемая в [1] функция обмена φ получена в результате решения уравнений обмена, исключив из них управляющий импульс u, что позволило создать колебательный процесс, зависящий от функции диссипации E_z, и сформулировать обратную задачу обмена (задачу идентификации СПО). Функция обмена содержит в показателе степени фазового множителя комплексное действие. Казалось бы, редуцирование уравнений обмена должно привести к одному из видов механики Гамильтона–Якоби [3], в которой основное уравнение (уравнение Гамильтона–Якоби) содержало бы комплексные действия, функцию Гамильтона и т. д. Однако этого произойти не может, так как физико-техническое обоснование комплексной формы указанных переменных обеспечить невозможно вне колебательных и волновых процессов.

Кроме обоснования модели обменных процессов при идентификации, редукция позволяет выполнять расчет функции Грина для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) аналитически. Однако рассчитанная таким образом функция Грина не будет содержать в себе параметров СПО, но только свойства объекта в рамках ОДУ.

Постановка задачи. В данной статье рассматриваются и решаются две задачи. В первой задаче на основании общей модели обмена, приведенной в [1], делается редукция до классической передаточной функции. Во второй задаче, связанной с первой, обосновывается возможность построения и затем приводится расчет функции Грина из ОДУ. В частности, важен ответ на вопрос, всякое ли ОДУ имеет свою функцию Грина, и какова ее природа как математической модели в этой связи? Ведь иногда идентификация объекта управления невозможна или нежелательна, но есть описание его модели в виде ОДУ. В этом случае функция Грина объекта может быть рассчитана из ОДУ при условии, что энерго-импульсный обмен формируется идеальным ИУП.

Редукция системы «прибор–объект». Формально редукция осуществляется устремлением кванта действия I к нулю, а управляющего и пространственно-временного диапазонов – к бесконечности. Имеем из [1]: $S_z = p_z x - E_z t$, где p_z – комплексный импульс; E_z – комплексная энергия; S_z – комплексное действие; x, t – координата и время. Обозначим $\Delta I = I$; $\Delta E_z = E_z$; $\Delta p_z = p_z$ и, выполняя предельный переход, получим:

$$\lim_{\Delta I \to 0} \frac{\Delta E_z}{\Delta I} = \sigma + j\omega; \quad \lim_{\Delta I \to 0} \frac{\Delta p_z}{\Delta I} = r + jk, \qquad (1)$$

где $\sigma + j\omega = s$ – комплексная частота; $r + jk = q$ – комплексное волновое число; $j = \sqrt{-1}$. С учетом (1) функция обмена $\varphi = A(x,t)\mathrm{e}^{S_z/I}$ [1] редуцируется до выражения $\delta A\,\mathrm{e}^{-st}$ (обозначение δ введено потому, что δA, возможно, не является полным дифференциалом от функции A).

Согласно правилам получения передаточных функций из ОДУ [4], амплитуда переходной импульсной характеристики должна быть весьма малой, и следует положить $\delta A(x,t) = f(x_0,t)$, где $f(x_0,t)$ – переходная импульсная характеристика для линейного обыкновенного дифференциального уравнения (ЛОДУ), полученного из ОДУ разложением в ряд по степеням x в окрестности точки x_0, с удержанием линейных слагаемых.

Таким образом, передаточная функция $W(x_0, s)$ в окрестности точки x_0будет иметь вид

$$W(x_0,s) = \int_0^\infty \delta A(x_0,t)\,\mathrm{e}^{-st}\,dt = \int_0^\infty f(x_0,t)\,\mathrm{e}^{-st}\,dt. \quad (2)$$

Из (2) следует, что переходная импульсная характеристика (оригинал) $f(x_0,t)$ – это малая (в пределе – бесконечно малая) амплитуда функции обмена φ.

Расчет функции Грина системы «прибор–объект» на основе модели объекта в виде обыкновенного дифференциального уравнения. Дифференциальные уравнения и, в частности, обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) – это хорошо изученная и, наверное, основная модель современных точных наук. Тем более полезно рассмотреть связь ОДУ с функцией Грина СПО. Это позволяет делать заключения о границах применимости функции Грина при решении прямой и обратной задач обменной механики (управления и идентификации).

При разложении ОДУ в ряд Тейлора по степеням функции Δx следует удержать постоянную и линейную части, при этом $\Delta x = dx$ вследствие того, что $\Delta I \to 0$.

Рассмотрим ОДУ для электромеханического объекта общего вида:

$$f(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{x} = \left[\overset{n}{x}\ \overset{n-1}{x}\ \ldots \ddot{x}\dot{x}x\right]^{\mathrm{T}}$; $\dot{\mathbf{x}} = \overset{n+1}{x}$; $\mathbf{u} = \left[\overset{n}{u}\ \overset{n-1}{u}\ \ldots \ddot{u}\dot{u}u\right]^{\mathrm{T}}$ – векторы переменных состояния объекта, их производных и управления объектом соответственно.

Так, из (3) видно, что переменные x и u симметрично входят в функцию f, но u не является переменной состояния объекта. Предполагая нужную здесь степень гладкости функции f, найдем разложение (3) в ряд по степеням $\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}$ относительно точки x_0, u_0 в малой области изменения этих переменных и, удерживая постоянную и линейную части (линейную – в виде дифференциала), получим:

$$f_{\overset{n+1}{x}}\, d\overset{n+1}{x} + f_{\overset{n}{x}}\, d\overset{n}{x} + \ldots + f_{\dot{x}} d\dot{x} + f_x dx + {}$$
$$+ f_{\overset{n}{u}}\, d\overset{n}{x} + \ldots + f_{\dot{u}} d\dot{u} + f_u du + f(x_0, u_0) = 0, \quad (4)$$

где $f_{\overset{i}{x}}$, $f_{\overset{k}{u}}$ – частные производные функции f первого порядка по переменным $\overset{i}{x}, \overset{k}{u}$ соответственно, взятые в точке x_0, u_0; $d\overset{i}{x}, d\overset{k}{u}$ – дифференциалы этих переменных; i, k – индексы, обозначающие порядок производных по времени от x, u, который также служит для x номером переменной состояния: $i, k = 1, 2, \ldots, n$.

Из (4) следует вывести функцию Грина ОДУ. В координатно-временном представлении функция Грина должна зависеть не от входного сигнала u, но только от x и t, и в этом смысле она линейна, однако частные производные в (4) зависят от x и u. При последовательном разложении (4) в интеграл Лапласа, сначала по комплексной частоте, затем – по комплексному волновому числу, получим функцию Грина в представлении «волновое число – частота», зависящую от u как от параметра.

Выделение параметра противоречит целостности идеи применения преобразования Лапласа к ОДУ, поскольку управляющая переменная здесь должна рассматриваться как дополнительная переменная состояния. Если же рассматривать такое расширенное пространство состояний, то это равносильно добавлению к комплексному действию в ядре преобразования Лапласа дополнительного слагаемого, так что наряду с импульсом и энергией должна присутствовать третья фундаментальная переменная обмена. Но такой подход не соответствует физике импульсно-энергетического обмена, тем более что сигнал u как раз и инициирует этот обмен.

Исходя из этого, функция (3) должна быть линейна и аддитивна по u. Так что для нахождения границ применимости рассматриваемого метода на нее следует наложить следующие ограничения:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \overset{i}{x}\, \partial \overset{l}{u}} = 0; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial \overset{k}{u}{}^2} = 0, \quad (5)$$

для всех актуальных i, l, k.

При выполнении (5) вместо f в (3) следует рассматривать функцию вида

$$\varphi(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}) + \sum_i K_i \overset{i}{u}, \quad (6)$$

где K_i – постоянные коэффициенты. Теперь вместо (4) на основании (6) будем иметь

$$\varphi_{\underset{x}{n+1}} d\overset{n+1}{x} + \varphi_{\underset{x}{n}} d\overset{n}{x} + \ldots + \varphi_{\dot{x}} d\dot{x} + \varphi_x dx +$$

$$+K_{\underset{u}{n}} d\overset{n}{u} + \ldots + K_{\dot{u}} d\dot{u} + K_u du + \varphi(x_0) + K_0 u_0 = 0, \quad (7)$$

где $\varphi(x_0) + K_0 u_0 = 0$ – кривая стационарных состояний (статическая характеристика ОДУ) и $d\overset{i}{x}$, $d\overset{k}{u}$ отсчитываются от точек на этой кривой:

$$x_0 = x_0(u_0). \quad (8)$$

Взаимодействие прибора и объекта требуется в данном случае для удержания объекта на кривой (8) при идентификации. Применяя метод Хевисайда, следует заменить дифференциалы d на вариации δ, так как обмен, согласно предлагаемому подходу, происходит переносом энергии и импульса гармоническими колебаниями с бесконечно малой амплитудой и отношение $\frac{dx}{du}$, выводимое таким образом из (7), не будет иметь смысла производной от функции x. Обозначив, как и ранее, комплексную частоту $s = \sigma + j\omega$, имеем вдоль кривой стационарных состояний, заменяя в (7) $d\overset{i}{x}$ на $s^i \delta x$ и $d\overset{k}{u}$ на $s^k \delta u$:

$$\varphi_{\underset{x}{n+1}} s^{n+1}\delta x + \varphi_{\underset{x}{n}} s^n \delta x + \ldots + \varphi_{\dot{x}} s^1 \delta x + \varphi_x \delta x +$$

$$+ K_{\underset{u}{n}} s^n \delta u + \ldots + K_{\dot{u}} s^1 \delta u + K_u \delta u = 0. \quad (9)$$

Из (9) получаем функцию Грина в представлении «координата – комплексная частота» (xs-представление) $W(x_0, s) = \frac{\delta x}{\delta u}$:

$$W(x_0, s) = \frac{K_{\underset{u}{n}} s^n + \ldots + K_{\dot{u}} s^1 + K_u}{\varphi_{\underset{x}{n+1}} s^{n+1} + \varphi_{\underset{x}{n}} s^n + \ldots + \varphi_{\dot{x}} s^1 + \varphi_x}. \quad (10)$$

Выражение (10) – это также и передаточная функция, зависящая от параметра x_0, определяемого кривой стационарных состояний.

Поскольку (10) – это функция (оригинал) по аргументу x_0 то, обозначив комплексное волновое число $q = r + jk$, разложим $W(x_0, s)$ в двусторонний интеграл Лапласа, полагая $x = x_0$ (имеем теперь множество кривых стационарных состояний), получим функцию Грина G в представлении «комплексное волновое число – комплексная частота» (qs-представление):

$$G(q, s) = \int_{-\infty}^{\infty} W(x, s) e^{qx} \, dx. \quad (11)$$

Из (11) видно, что qx представляет собой пространственную комплексную фазу, интеграл Лапласа – двусторонний. Так как функция $G(q, s)$ получена расчетом, а не идентификацией, для существования интеграла (11) следует определить его полосу сходимости, ограниченную двумя абсциссами [5]. Действительно, $\int_{-\infty}^{\infty} W(x, s) e^{qx} \, dx = \int_0^{\infty} W(-x, s) e^{-qx} \, dx + \int_0^{\infty} W(x, s) e^{qx} \, dx$, и для каждого из этих двух интегралов должна существовать своя абсцисса абсолютной сходимости.

Аналитический расчет интеграла (11) может представлять значительные трудности, поэтому целесообразна аппроксимация подынтегрального выражения.

В случае, если переменная x будет представлять собой рассогласование по управляемой переменной в $W(x, s)$, разложение (11) обеспечит равноправность переменных q, s при расчете регулятора в системе управления, так как будет активизирована ее импульсная составляющая.

Пример расчета функции Грина системы «прибор–объект» на основе модели объекта в виде ОДУ. Рассмотрим упрощенную математическую модель прямолинейного движения судна с электродвижением в водоеме больших размеров.

Эта модель имеет вид: $M \frac{dv}{dt} + Kv^2 = F$, где F – сила тяги винта, обусловленная моментом гребного электродвигателя; v – скорость движения судна как целого; Kv^2 – сила сопротивления среды; M – масса судна с учетом присоединенной массы воды; $K = \frac{R_0}{v_0{}^2}$ – коэффициент сопротивления среды, R_0 – сила сопротивления на полном ходу судна; v_0 – скорость полного хода судна.

После введения обозначений $x = v$; $u = F$ получим

$$M \frac{dx}{dt} + Kx^2 - u = 0, \quad (12)$$

так что $f(\dot{x}, x, u) = \varphi(\dot{x}, x) + \sum_i K_i \overset{i}{u} = \dot{x} + \frac{K}{M} x^2 - \frac{u}{M}$. Разложение f по степеням с удержанием линейных слагаемых и постоянной части, имеет вид: $\frac{\partial f}{\partial \dot{x}} d\dot{x} + \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial u} du + f(x_0, u_0) = 0.$ Найдем производные от f: $\frac{\partial f}{\partial \dot{x}} = 1;\ \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2K}{M} x;\ \frac{\partial f}{\partial u} = -\frac{1}{M}.$ Применяя метод Хевисайда относительно кривой стационарных состояний и заменяя далее дифференциалы на вариации, получим для (12): $\delta x\left(s + \frac{2K}{M} x_0\right) - \frac{1}{M}\delta u = \frac{u_0}{M} - \frac{K}{M} x_0^2.$ Таким образом, кривая стационарных состояний имеет вид $u_0 = Kx_0^2,$ а функция Грина в *xs*-представлении – $W(x_0, s) = \frac{1}{M}\frac{1}{s + \frac{2K}{M}x_0}.$ Функция Грина G при замене в $W(x_0, s)$ $x = x_0$ в *qs*-представлении выглядит следующим образом:

$$G(q,s) = \frac{1}{M}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s + \frac{2K}{M}x} \mathrm{e}^{qx}\, dx =$$

$$= \frac{1}{M}\left(\int_0^{\infty} \frac{1}{s - \frac{2K}{M}x} e^{-qx} dx + \frac{1}{M}\int_0^{\infty} \frac{1}{s + \frac{2K}{M}x} e^{qx} dx\right) =$$

$$= \frac{1}{2K}\left[\mathrm{e}^{-\frac{M}{2K}qs}\, Ei\left(\frac{M}{2K}qs\right) - \mathrm{e}^{\frac{M}{2K}qs}\, Ei\left(-\frac{M}{2K}qs\right)\right],$$

где $Ei(\ldots)$ – интегральная показательная функция.

Для полученной функции $G(q,\ s)$ требуется анализ полосы сходимости и непрерывности в этой полосе.

Обсуждение результатов. Учитывая то, что в (10), (11) квант действия $I \to 0$, можно полагать, что функции $W(x_0, s)$ и $G(q,\ s)$ получены при нулевом импульсно-энергетическом обмене. Однако это не мешает, пользуясь символическим методом обращения преобразования Лапласа, получать функции Грина в координатно-временном представлении.

Интересно отметить, что при нулевом кванте действия (т. е. при нулевой амплитуде колебаний) определены длины волн $\lambda = 1/k$ и их фазовые скорости $v = \omega\lambda$.

Главное отличие функции Грина $G(q,\ s)$, полученной здесь из ОДУ, от функции Грина, полученной в [1] из уравнений обмена, состоит в отсутствии в ней случайной составляющей. Действительно, функция $G(q,\ s)$ рассчитана на основе детерминированной модели без потери точности последней и поэтому сама должна быть детерминированной. Геометрически функция $G(q,\ s)$ представляет собой поверхность в трехмерном гиперпространстве комплексных плоскостей G, q, s и в ней можно выделить пространственную амплитуду и фазу.

В случае, если исходная модель представляет собой ЛОДУ, функция (10) не будет зависеть от x_0, так что разложение (11) $G(q, s)$ для идеального прибора будет неопределенным. Но для прибора с ограничениями по измерительно-управляющему диапазону и «полосе» частот, согласно [6], получим:

$$G(q,\ s) = G_{\Pi}(q,\ s) W_{\text{o}}(s). \qquad (13)$$

В (13) учтено правило композиции функций G, W. Здесь $G(q,\ s)$ – функция Грина СПО; $G_{\Pi}(q,\ s)$ – функция Грина ИУП с указанными ограничениями, но с нулевым квантом действия; $W_{\text{o}}(s)$ – функция объекта (10) для ЛОДУ.

С учетом того, что в [1] активная часть импульса присутствует в уравнении обмена как управляющий сигнал, следует оценить целесообразность использования в (13), и даже в (11), вещественной части переменной q. Ведь диссипативные (и контрдиссипативные) свойства объекта уже учтены вещественной частью s. Если таким образом положить в q $r = 0$, то будем иметь вместо (11) двустороннее преобразование Фурье с волновым числом k. При этом подынтегральная функция должна обладать свойством абсолютной интегрируемости, что обеспечивается (при нулевом кванте действия) прибором с ограничениями по измерительно-управляющему диапазону.

Выводы. Функция Грина электромеханической системы представляет собой альтернативный и в некоторых случаях более удобный для исследования и управления вид модели. Эта модель может быть получена независимо от существования модели системы в виде ОДУ.

Функция Грина СПО с одной степенью свободы, при определенных ограничениях управления, указанных в статье, может быть выведена из ОДУ. Правила вывода основаны на малости импульсно-энергетического обмена в СПО и идеальности ИУП.

Линейность функции Грина СПО есть следствие ее независимости от входного сигнала. В случае модели объекта в виде ОДУ это означает требование линейности последнего по управляющему воздействию.

Аналитическое получение функции Грина из ОДУ сопряжено со значительными трудностями, требует оценки полосы сходимости для двустороннего интеграла Лапласа, что показано в примере расчета.

Список литературы

1. Омельченко А. Ю. Математические модели обменных процессов для идентификации и управления электромеханическими объектами // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 67–74. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-67-74.

2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. М.: Наука, 1984. 752 с.

3. Полак Л. С. Вариационные принципы механики: их развитие и применения в физике. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 600 с.

4. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука. Физматлит, 1975. 768 с.

5. Ван дер Поль Б., Бремер Х. Операционное исчисление на основе двустороннего преобразования Лапласа. М.: Изд-во иностр. лит., 1952. 507 с.

6. Омельченко А. Ю. Обоснование математической модели измерительно-управляющего прибора для физической теории управления // Сб. докл. 72-й науч.-техн. конф. ППС ун-та. СПб.: СПГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 146–151.

Информация об авторе

Омельченко Алексей Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: alex1957.12@mail.ru

References

1. Omel'chenko A. Ju. Matematicheskie modeli obmennyh processov dlja identifikacii i upravlenija jelektromehanicheskimi ob#ektami // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 3. S. 67–74. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-67-74. (In Russ.).

2. Landau L. D., Lifshic E. M. Kvantovaja mehanika. M.: Nauka, 1984. 752 s. (In Russ.).

3. Polak L. S. Variacionnye principy mehaniki: ih razvitie i primenenija v fizike. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2010. 600 s. (In Russ.).

4. Besekerskij V. A., Popov E. P. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija. M.: Nauka. Fizmatlit, 1975. 768 s. (In Russ.).

5. Van der Pol' B., Bremer H. Operacionnoe ischislenie na osnove dvustoronnego preobrazovanija Laplasa. M.: Izd-vo inostr. lit., 1952. 507 s. (In Russ.).

6. Omel'chenko A. Ju. Obosnovanie matematicheskoj modeli izmeritel'no-upravljajushhego pribora dlja fizicheskoj teorii upravlenija // Sb. dokl. 72-j nauch.-tehn. konf. PPS un-ta. SPb.: SPGJeTU «LJeTI», 2019. S. 146–151. (In Russ.).

Information about the author

Aleksey Yu. Omelchenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: alex1957.12@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.01.2024; принята к публикации после рецензирования 12.03.2024; опубликована онлайн 21.06.2024.

Submitted 13.01.2024; accepted 12.03.2024; published online 21.06.2024.